

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

**Сперкач Майя Олегівна**

УДК 004.9'1:[519.854+681.513]](043.3)

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ  
ОПЕРАТИВНО-КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНУВАННЯ  
ДРІБНОСЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА  
ЗА КОНЦЕПЦІЄЮ «ТОЧНО В СТРОК»**

Спеціальність 05.13.06 – інформаційні технології

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизованих систем обробки інформації та управління Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Павлов Олександр Анатолійович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»,  
декан факультету інформатики та  
обчислювальної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Левикін Віктор Макарович**,  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
завідувач кафедри інформаційних управляючих систем

кандидат технічних наук, доцент  
**Харченко Олександр Григорович**,  
Національний авіаційний університет,  
професор кафедри комп'ютерних інформаційних технологій

Захист відбудеться 27 жовтня 2016 р. о 15 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.29 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корпус №11, аудиторія 215.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий 20 вересня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Теленик С.Ф.

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Ефективне управління виробництвом в умовах мінливості його характеру вимагає застосування сучасних концепцій управління, які забезпечують швидке і ефективне реагування на зміни. Основу такого управління складають точна та вичерпна інформація про стан виробничої, фінансової діяльності та ресурси підприємства, налагоджена система бізнес-процесів і ефективний управлінський менеджмент, невід'ємною складовою якого є оперативно-календарне планування. Планування, в таких умовах виробництва, зокрема дрібносерійного, потребує опрацювання великих обсягів інформації на досить стислих відрізках часу. Тому виправданий пошук нових підходів до ефективного розв'язання задач оперативно-календарного планування, здатних забезпечити організацію взаємоузгодженої роботи всіх підрозділів підприємства при ощадливому використанні ресурсів та виконанні планових завдань точно в строк.

Теоретичні основи реалізації такого підходу закладені у працях І. Ансоффа, М. Мескона, А. Томсона та А. Стрікланда, Д. Шендела та К. Хаттена, Дж. Пірса та Р. Робінсона. Значний внесок до їх розвитку належить Ф. Абрамсу, С. Аджирісу, М. Іпатову, Г. Мінцбергу, Т. Пітерсу, М. Портеру, Г. Саймону, В.Дж. Стівенсону, А. Стрікланду, К. Хоферу, Г. Штейнеру, С. Янгу. Результати їх досліджень виявилися ефективними та лягли в основу створення систем управління, які широко застосовуються. Пристосування цих систем до умов мінливості сучасного виробництва вимагає використання різних концепцій планування та управління, однією із яких є концепція «точно в строк». Відомі моделі та методи оперативно-календарного планування не завжди дозволяють реалізувати цю концепцію у повній мірі, тому виникає необхідність у розв'язанні нових задач, які зазвичай є важкорозв'язуваними.

Теорія важкорозв'язуваних задач набула розвитку та конкретизації у працях А.Е. Воронкова, В.В. Єлісеєва, О.С. Орлова, І.Н. Пащенко, Я.Д. Плоткіна, Г.В. Семенова, В.І. Терещенка, Е.С. Шершньова. Зусиллями багатьох учених, насамперед В.М. Глушкова, В.С. Михалевича, І.В. Сергієнка, М.З. Згуровського, Н.З. Шора, В.С. Танаєва, В.В. Шкурби, В.Л. Волковича, О.А. Павлова, Р.Л. Грема, Е.Л. Лоулера, Ж.К. Ленстра, А.І. Семенова, В.М. Португала була розроблена система базових алгоритмів розв'язання основних класів задач оперативно-календарного планування дрібносерійного виробництва. Але відомі методи не завжди дозволяють отримувати близькі до оптимальних оперативно-календарні плани виробництва за прийнятний час, до того ж виникає потреба у інструментах формування і перевірки умов розв'язання все нових класів задач.

Таким чином, постає науково-практична задача розроблення інформаційної технології оперативно-календарного планування дрібносерійного виробництва (ІТОКПДВ) за концепцією «точно в строк», яка дозволяє будувати близькі до оптимальних за часовими критеріями календарні плани, що призводить до підвищення ефективності функціонування виробничих систем. Її розв'язання вимагає досліджень, виконаних у дисертаційній роботі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з планами наукових досліджень кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління Національного

технічного університету України «Київський політехнічний інститут» у рамках теми №2705-ф «Теорія ПДС-алгоритмів і створення на її основі моделей і методів планування, прийняття рішень» (номер держреєстрації 0114U003432).

**Мета і завдання дослідження.** *Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування виробничих систем за рахунок створення, впровадження та експлуатації інформаційної технології оперативно-календарного планування дрібносерійного виробництва за концепцією «точно в строк», в основу якої покладені моделі та методи, які дозволяють будувати оптимальні або близькі до оптимальних за часовими критеріями календарні плани.*

Для досягнення мети дослідження необхідно виконати наступні *завдання*:

- 1) виконати аналітичний огляд існуючих систем планування, моделей планування, методів складання календарних планів, систем оперативно-календарного планування виробництва;
- 2) розробити методи розв'язання задач складання розкладу, що вирішуються при оперативно-календарному плануванні виробництва:
  - визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним жорстким директивним строком паралельними ідентичними пристроями;
  - визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним жорстким директивним строком паралельними пристроями різної продуктивності;
  - мінімізації максимуму відхилення від директивного строку моментів завершення завдань паралельними ідентичними пристроями;
  - максимально рівномірного завантаження паралельних пристроїв різної продуктивності;
- 3) дослідити ефективність розроблених методів побудови розкладів;
- 4) розробити інформаційну технологію оперативно-календарного планування дрібносерійного виробництва за концепцією «точно в строк», з використанням запропонованих методів;
- 5) здійснити експериментальне дослідження розробленої інформаційної технології.

*Об'єктом дослідження є оперативно-календарне планування дрібносерійного виробництва.*

*Предметом дослідження є інформаційна технологія оперативно-календарного планування дрібносерійного виробництва за концепцією «точно в строк».*

**Методи дослідження.** Для виконання поставлених завдань у роботі було використано методи: системного аналізу (при проектуванні інформаційної технології); теорії розкладів, дослідження операцій, теорії складності (при розробленні методів розв'язання задач складання розкладів); комп'ютерного моделювання (при експериментальному дослідженні ефективності методів розв'язання задач складання розкладів).

**Наукова новизна отриманих результатів.** У дисертаційній роботі отримані такі наукові результати:

1. Вперше сформульовані достатні умови оптимальності допустимого

розв'язку для важкорозв'язуваної задачі складання допустимих розкладів виконання завдань паралельними пристроями різної продуктивності з метою визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним директивним строком.

2. Вперше сформульовані достатні умови оптимальності допустимого розв'язку для важкорозв'язуваних задач складання допустимих розкладів виконання завдань паралельними ідентичними або з різними продуктивностями пристроями з метою мінімізації максимуму відхилення моментів завершення завдань пристроями від заданого строку.
3. Вперше на основі сформульованих достатніх умов оптимальності допустимого розв'язку для виділених задач розроблено методи їх розв'язання, які для поширених на практиці виробничих задач мають статистично сталі високі показники роботи (точність, ступінь досягнення оптимуму, час роботи); на основі сформульованих достатніх умов оптимальності визначено верхню межу відхилення значення критерію отриманих розв'язків від оптимального значення критерію.
4. Набув подальшого розвитку метод розв'язання задачі визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним директивним строком паралельними ідентичними пристроями, який базується на основі достатніх умов оптимальності та, на відміну від існуючих методів, має статистично сталі високі показники роботи.
5. Удосконалено інформаційну технологію оперативно-календарного планування дрібносерійного виробництва за концепцією «точно в строк» за рахунок застосування розроблених ефективних методів розв'язання виробничих задач, характерних для дрібносерійного виробництва, яка, на відміну від існуючих інформаційних технологій, призвела до зменшення часу формування планів і підвищення їх якості за часовими критеріями, згідно концепції «точно в строк».

### **Практичне значення отриманих результатів**

Усі теоретичні напрацювання (моделі та методи) доведені до алгоритмів і реалізовані у ІТОКПДВ за концепцією «точно в строк». У сучасних умовах планування роботи виробництва незаперечним є практичне значення таких алгоритмів складання розкладів виконання завдань: визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним директивним строком паралельними (ідентичними або з різними продуктивностями) пристроями; мінімізації максимуму відхилення від директивного строку моментів завершення завдань паралельними ідентичними пристроями; максимально рівномірного завантаження паралельними пристроями різної продуктивності. Ці алгоритми використані при розробленні інформаційної технології оперативно-календарного планування дрібносерійного виробництва за концепцією «точно в строк».

Створена ІТОКПДВ за концепцією «точно в строк» частково впроваджена в науково-технічних розробках ТОВ «БІ ДЖІ ЕФ ЦЕНТРАЛ ЄУРОП», в якій використовуються розроблені моделі, методи та підходи до оперативно-календарного планування виробництва при розробці рішень з управління проектами. Це дозволило прискорити процес розподілу завдань між виконавцями та отримати

такі плани виконання проектів, які забезпечують виконання всіх запланованих завдань максимально точно в строк. Отримано акт впровадження результатів.

Розроблену ІТОКПДВ за концепцією «точно в строк», впроваджено в приватному акціонерному товаристві «Виробничо-комерційна фірма «АС»». Її використання дозволило покращити процес планування виробництва: скоротити час планування та виготовлення виробів, заощаджувати виробничі ресурси, і тим самим збільшити об'єми виробництва. Отримано акт впровадження результатів.

Результати роботи впроваджені також у навчальний процес кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» і використовуються для викладання курсу «Теорії розкладів». Отримано акт впровадження результатів. Інформаційна технологія рекомендована до впровадження на підприємствах з дрібносерійним характером виробництва.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані автором особисто. Їх основний зміст опублікований у працях [1-10]. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать такі результати: метод розв'язання задачі складання допустимого розкладу виконання завдань паралельними ідентичними пристроями з метою визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним директивним строком [1, 2]; визначення достатніх умов оптимальності та методу розв'язання задачі складання допустимого розкладу виконання завдань паралельними пристроями різної продуктивності з метою визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним жорстким директивним строком [6]; визначення достатніх умов оптимальності та методу розв'язання задачі складання розкладу виконання завдань паралельними ідентичними пристроями з метою мінімізації максимуму відхилення від директивного строку моментів завершення завдань пристроями [5, 7]; визначення достатніх умов оптимальності та методу розв'язання задачі складання розкладу виконання завдань паралельними пристроями різної продуктивності з метою мінімізації максимуму відхилення від директивного строку моментів завершення завдань пристроями [10]; інформаційна технологія (ІТ) оперативно-календарного планування дрібносерійного виробництва [4, 8, 9].

Автор прийняв участь на паритетних засадах у розробці: загальної схеми розв'язання задачі складання допустимого розкладу виконання завдань паралельними ідентичними пристроями з метою визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним директивним строком [3]; загальної схеми розв'язання задач в багаторівневій моделі планування у складних системах [8, 9].

**Апробація результатів роботи.** Основні положення і результати дисертаційної роботи оприлюднені й отримали позитивну оцінку на міжнародних науково-практичних конференціях, зокрема: Х міжнародній науково-практичній конференції «Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2015» (м. Чернігів, 2015 р.); ІХ міжнародній науково-практичній конференції «Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2014» (м. Чернігів, 2014 р.); VIII міжнародній науково-практичній конференції «Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2013» (м. Чернігів, 2013 р.); Х міжнародній науково-практичній конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та

проблеми обчислювального інтелекту» (м. Херсон, 2015 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (м. Київ, 2014 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми економіки та управління сучасної України» (м. Ужгород, 2014 р.); XXI міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика-2014» (м. Київ, 2014 р.); IV Всеукраїнській заочній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології» (м. Київ, 2013 р.); I міжнародній науково-практичній конференції молодих науковців «Інформаційні технології як інноваційний шлях розвитку України у XXI столітті» (м. Ужгород, 2012 р.).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 22 наукові праці, в тому числі 10 статей у наукових фахових виданнях України (з них 8 статей у виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз) та 12 публікацій у збірниках матеріалів наукових конференцій.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 165 найменувань та шести додатків. Загальний обсяг роботи 222 сторінки, з яких 175 сторінок основного тексту, 21 сторінка використаних джерел та 26 сторінок додатків. Робота містить 39 рисунків і 11 таблиць.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведені дані про впровадження результатів роботи, публікації та особистий внесок автора.

У **першому** розділі представлений огляд літератури за напрямом дисертаційного дослідження. Описано принципи функціонування та застосування систем планування і контролю виробництва для організації рівномірної, ритмічної взаємоузгодженої роботи всіх виробничих підрозділів підприємства. Наведено класифікацію різних типів організації виробництва та детальний опис характеристики дрібносерійного виробництва. Розглянуто відомі методології та парадигми з управління виробництвом, наведена їх порівняльна характеристика. Обґрунтовано вибір методології ощадливого виробництва, у межах якої велось розроблення ІТОКПДВ за концепцією «точно в строк», здатної з урахуванням особливостей дрібносерійного виробництва та поставленої мети забезпечити його гнучку перебудову. Розглянуто зміст та завдання оперативного управління основним виробництвом, основною складовою якого є оперативно-календарне планування та диспетчеризація, для яких і було розроблено ІТ. Виконано аналіз відомих ІТ планування роботи та управління виробництвом. Показано, що важливою складовою ІТОКПДВ за концепцією «точно в строк» є моделі теорії розкладів. Наведено класифікацію задач теорії розкладів та описані їх складові і умови розв'язання. Розглянуто методи розв'язання задач теорії розкладів та проведений детальний аналіз використання цих методів для реалізації подібних задач. Описано застосування методології побудови ПДС-алгоритмів для важкорозв'язуваних задач комбінаторної оптимізації для розробки алгоритмів складання розкладів, що забезпечать високу якість отримуваних результатів і не

будуть потребувати значних обчислювальних ресурсів (під ПДС-алгоритмом розуміється алгоритм, який містить поліноміальну декомпозиційну складову, яка строго реалізує оптимальний розв'язок). Аналіз літературних джерел дозволив виявити і порівняти роботи, що пропонують різні підходи до розв'язання досліджуваних задач теорії розкладів, відібрати корисні моделі і методи та визначити напрями досліджень нових, уточнити вимоги до розроблюваної ІТ.

Розроблено підхід до створення ІТОКПДВ за концепцією «точно в строк», здатної задовольнити визначеним вимогам. Детально описано процес оперативно-календарного планування виробничого підприємства, що складається з множини виробничих дільниць. Підприємство виробляє ряд видів продукції, які визначаються об'ємним планом виробництва згідно отриманих замовлень. Для кожного виду продукції відома технологічна карта її виготовлення. На основі об'ємного плану виробництва, з урахуванням директивних строків замовлень, складається розклад виготовлення виробів та планується робота виробничих дільниць підприємства. Дільниці підприємства є унікальними – кожна з них може виконувати лише певний вид технологічних операцій (завдань).

Дільниця має в своєму складі деякий набір обладнання ( $m$  пристроїв), на який надходить відповідна множина завдань  $J = \{1, 2, \dots, j, \dots, n\}$ . Пристрої працюють паралельно, є взаємозамінними і відрізняються один від одного продуктивністю виконання завдань. При цьому пристрої можна впорядкувати за швидкістю виконання завдання і цей порядок однаковий для всіх завдань: для пристрою  $i$  заданий коефіцієнт  $k_i$  такий, що тривалість виконання завдання  $j$  на пристрої  $i$  дорівнює  $k_i p_j$  ( $i = \overline{1, m}$ ). Еталонним будемо називати пристрій з коефіцієнтом продуктивності  $k = 1$ . У цьому сенсі величина  $p_j$  є тривалістю виконання завдання  $j$  на еталонному пристрої. Величину  $k_i$  будемо називати коефіцієнтом продуктивності. Передбачається, що всі завдання множини  $J$  надходять одночасно та можуть мати спільний жорсткий директивний строк  $d$ , процес обслуговування кожного завдання протікає без переривань до завершення обслуговування. Всі пристрої працюють без переривань. У залежності від вимог до оперативно-календарного планування для дільниць можуть бути сформульовані різні критерії оптимальності розкладів. На рис.1 наведена схема взаємозв'язків задач складання розкладів, які реалізовані в ІТОКПДВ за концепцією «точно в строк», та наведені критерії оптимізації. Ці задачі розв'язуються для кожної дільниці окремо, з урахуванням результатів планування на попередніх етапах.

Визначені завдання реалізації підходу до створення ІТ, пов'язані з вибором архітектури інструментального комплексу, розробленням структур даних, інтерфейсів взаємодії та прийняттям рішень щодо структури і параметрів функціонування ІТОКПДВ на основі запропонованих методів.

У **другому** розділі запропоновано методи розв'язання задач визначення максимально пізнього моменту початку виконання в допустимому розкладі завдань із спільним директивним строком паралельними пристроями. На практиці пристрої можуть бути як ідентичними так і мати різні продуктивності. У роботі спочатку досліджується задача складання розкладу роботи паралельних ідентичних пристроїв



(задача 1), а потім – задача з паралельними одноманітними (пропорційними) пристроями (задача 2). Перша задача є частковим випадком другої.

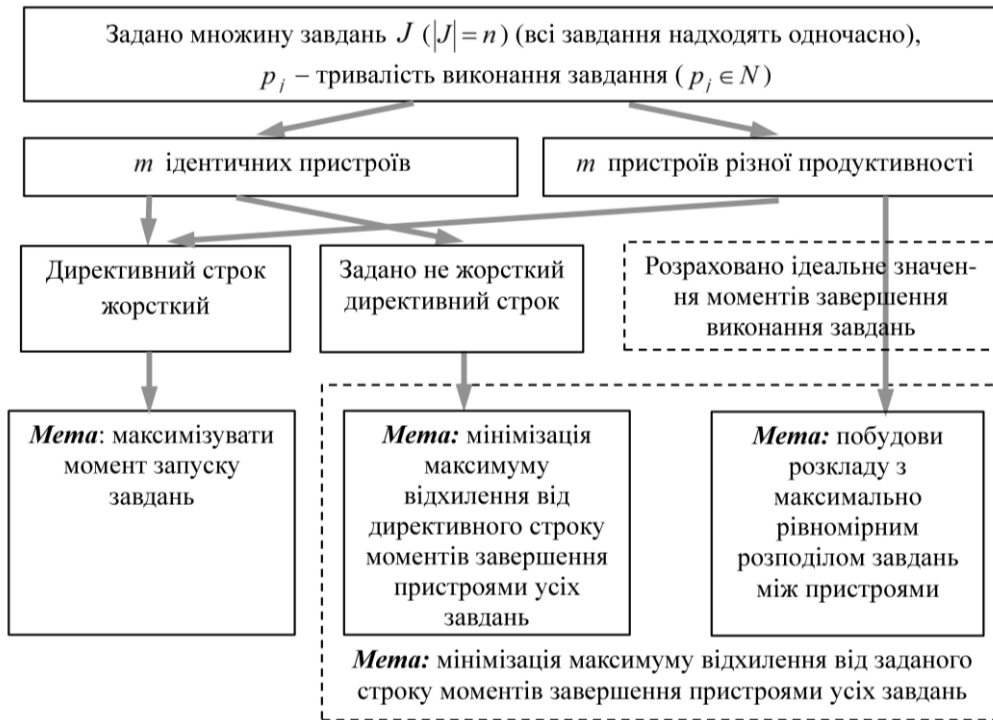


Рис. 1. Схема взаємозв'язків задач складання розкладів

**Задача 1.** Задано множину завдань  $J = \{1, 2, \dots, n\}$  та кількість пристроїв  $m$ . Пристрої працюють паралельно і є взаємозамінними. Пристрої відрізняються один від одного продуктивністю виконання завдань. Для кожного пристрою  $i$  заданий коефіцієнт  $k_i$  такий, що тривалість виконання завдання  $j$  на пристрої  $i$  дорівнює  $k_i p_j$  ( $i = \overline{1, m}$ ). Усі завдання множини  $J$  надходять одночасно та мають спільний жорсткий директивний строк  $d$ . Необхідно знайти максимальний момент запуску пристроїв  $r_{\max}$ , що дозволяє отримати допустимий розв'язок. Під моментом запуску розуміється момент початку виконання множини завдань. Будемо вважати, що виконуються такі умови: еталонним є найбільш продуктивний пристрій і у нього  $k_i = 1$ , усі  $p_j$  є цілими числами. За умови рівності величин  $k_i$  маємо задачу з ідентичними пристроями. Для цієї задачі невідомий поліноміальний алгоритм розв'язання.

Позначимо через  $T_i(\sigma) = \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij}$  сумарну тривалість виконання завдань на пристрої  $i$ ,  $i = \overline{1, m}$ , у довільному допустимому розкладі  $\sigma$ , де  $p_{ij}$  – тривалість завдання, яке  $j$ -им виконується на  $i$ -му пристрої,  $n_i$  – кількість завдань, які виконуються на  $i$ -му пристрої,  $\sum_{i=1}^m n_i = n$ . Нехай  $T^*(\sigma) = \max_i T_i(\sigma)$ ,  $i = \overline{1, m}$  та  $T^*(\sigma)$  є мінімально можливим. Позначимо через  $T^* = \min_{\sigma \in \Omega} T^*(\sigma) = T^*(\sigma^*)$ , де  $\Omega$  – множина всіх допустимих розкладів. У цьому випадку, в допустимому розкладі  $\sigma^*$  момент запуску пристроїв є максимально пізнім і дорівнює  $r_{\max} = d - T^*$  та для будь-якого

іншого допустимого розкладу значення моменту запуску не може бути більше. Якщо  $r_{\max} < 0$ , то це означає, що допустимого розкладу не існує. Нехай

$$C^* = \left\lfloor \sum_{j=1}^n p_j / m \right\rfloor \quad (1)$$

де  $\lfloor a \rfloor$  – найбільше ціле, для якого виконується  $\lfloor a \rfloor \leq a$ ,  $\delta = \sum_{j=1}^n p_j - C^* m$  (за визначенням  $\delta \geq 0$ ).

Введемо позначення:  $C_i(\sigma) = r + T_i(\sigma)$  – момент завершення виконання всіх завдань пристроєм  $i$ ,  $i = \overline{1, m}$ , у розкладі  $\sigma$ ;  $\Delta_i(\sigma) = \max\{0; T_i(\sigma) - C^*\}$ ,  $i = \overline{1, m}$  – виступ пристрою  $i$ ;  $I_\Delta(\sigma)$  – множина пристроїв, у яких  $\Delta_i(\sigma) > 0$ ;  $R_i(\sigma) = \max\{0; C^* - T_i(\sigma)\}$ ,  $i = \overline{1, m}$  – резерв пристрою  $i$ ;  $I_R(\sigma)$  – множина пристроїв, у яких  $R_i(\sigma) > 0$ ;  $I_0(\sigma)$  – множина пристроїв, у яких  $\Delta_i(\sigma) = R_i(\sigma) = 0$ ;  $J_i(\sigma)$  – множина завдань, які в розкладі  $\sigma$  виконуються пристроєм  $i$ . Із визначення величин  $R_i(\sigma)$  і  $\Delta_i(\sigma)$  слідує, що  $R_i(\sigma)\Delta_i(\sigma) = 0$ ,  $i = \overline{1, m}$ .

З урахуванням позначень цільова функція задачі має вигляд:  $r(\sigma) = d - (C^* + \max_i \Delta_i(\sigma)) = d - C^* - \max_i \Delta_i(\sigma)$ . Оскільки величини  $d$  і  $C^*$  не залежать від упорядкування, максимізація моменту запуску  $r(\sigma)$  еквівалентна мінімізації величини максимального із виступів  $\max_i \Delta_i(\sigma)$ .

**Достатні умови оптимальності** (ДУО) (по суті дають контур ідеального розкладу – розкладу, який в ідеальному випадку можна отримати для множини завдань з сумарною тривалістю  $\sum_{j=1}^n p_j$ ):

**ДУО 1.1.** Якщо  $\delta = 0$ , то *рівномірний розклад*, тобто розклад, у якого:  $T_i(\sigma) = C^*$ ,  $i = \overline{1, m}$ , є оптимальним.

**ДУО 1.2.** Випадок  $\delta > 0$ . Нехай,  $b$  – найбільший спільний дільник (НСД) величин  $p_j$ ,  $j = \overline{1, n}$ , тоді розклад, в якому  $\Delta_i(\sigma) \in \{0, b\}$ ,  $i = \overline{1, m}$  є оптимальним. Якщо поділити величину  $p_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  на  $b$ , то умова оптимальності в цьому випадку формулюється так: розклад, в якому для всіх  $i = \overline{1, m}$  виконується умова  $\Delta_i(\sigma) \in \{0, 1\}$ , є оптимальним (далі будемо вважати, що всі  $p_j$  мають НСД, рівний 1).

У роботі доведено, що не існує оптимального розкладу, який належить до класу  $\Psi$  розкладів, які задовольняють умовам

$$\neg \exists h, j, s \mid h \in I_\Delta(\sigma), j \in J_h(\sigma), s \in I_R(\sigma), p_j \leq R_s(\sigma), \quad (2)$$

$$\neg \exists h, j, s \mid h \in I_\Delta(\sigma), j \in J_h(\sigma), s \in I_R(\sigma), p_j \leq \Delta_h(\sigma), R_s(\sigma) > 0. \quad (3)$$

Для покращення розкладу необхідно направити зусилля на зменшення максимального з виступів  $\max_{i \in I_\Delta} \Delta_i(\sigma)$ . Для цього запропоновано використовувати обмін завданнями між двома пристроями: перший пристрій  $h$  із множини  $I_\Delta(\sigma)$  з

максимальним значенням  $\max_{i \in I_\Delta} \Delta_i(\sigma)$ , а другий – довільний пристрій  $s$  із однієї з множин  $I_R(\sigma)$ ,  $I_\Delta(\sigma)$  або  $I_0(\sigma)$  ( $s \neq h$ ). При цьому, деяка підмножина завдань з пристроєм  $h$  (позначимо її  $K_h(\sigma)$ ,  $K_h(\sigma) \subseteq J_h(\sigma)$ ) міняється місцями з деякою підмножиною завдань з пристроєм  $s$  (позначимо цю підмножину, як  $L_s(\sigma)$ ,  $L_s(\sigma) \subseteq J_s(\sigma)$ ), при цьому, множина  $L_s(\sigma)$  може бути порожньою. Позначимо через  $\theta$  різницю між сумами тривалостей завдань, які приймають участь в операції обміну:  $\theta = \sum_{j \in K_h(\sigma)} p_j - \sum_{j \in L_s(\sigma)} p_j$ . У роботі визначені умови, які залежать від значень величин  $\theta$ ,  $\Delta_h(\sigma)$ ,  $R_s(\sigma)$ , при яких операції обміну призводять до покращення розкладу. З огляду на ці умови та наслідки, у роботі розроблена множина операцій обміну, яка розділена на чотири типи: **A**, **B**, **B**, **G**, які, в свою чергу, в залежності від кількості завдань, що приймають участь в операції, розділені на п'ять підтипів.

ДУО 1.1, ДУО 1.2 та запропоновані операції обміну покладені в основу розробленої поліноміальної складової ПДС-алгоритму розв'язання задачі:

*Крок 1* Побудувати початковий розклад  $\sigma^0$ ,  $\sigma = \sigma^0$ .

*Крок 2* Визначити множини  $I_\Delta(\sigma)$ ,  $I_R(\sigma)$ ,  $I_0(\sigma)$ .

*Крок 3* **ЯКЩО** виконується одна із достатніх умов оптимальності

*ТО* перейти на крок 6 ( $\sigma$  – оптимальний розклад).

*Крок 4* Визначити пристрій  $h$ , якому відповідає  $\Delta_h(\sigma) = \max_{i \in I_\Delta} \Delta_i(\sigma)$ .

*Крок 5* Виконати для пристрою  $h$ , перебираючи всі пристрої  $s \in I_R(\sigma) \cup I_0(\sigma) \cup I_\Delta(\sigma)$ , покращуючий обмін типу **A**, **B**, **B** або **G** (отримати розклад  $\sigma^1$ ).

**ЯКЩО** таких обмінів не знайшлось, *ТО* перейти на крок 6,

**ІНАКШЕ**  $\sigma = \sigma^1$ , перейти на крок 2.

*Крок 6* Визначити максимально пізній момент запуску завдань на виконання в поточному розкладі  $\sigma$ :  $r(\sigma) = d - \left( C^* + \max_i \Delta_i(\sigma) \right)$ . **КІНЕЦЬ АЛГОРИТМУ**.

Можливі варіанти реалізації кроку 5: знаходимо перший обмін, який покращує розклад і виконуємо його (стратегія *first*); перебираємо усі допустимі обміни, знаходимо серед них найкращий та виконуємо його (стратегія *best*); в операціях обміну приймають участь не більше 2-х завдань (стратегія *simple*); в операціях обміну приймають участь до 4-х завдань (стратегія *complex*). Верхня межа відхилення значення критерію отриманого розв'язку від оптимального значення становить  $\max_i \Delta_i(\sigma)$  (якщо  $\delta = 0$ ),  $\max_i \Delta_i(\sigma) - 1$  (якщо  $\delta > 0$ ).

Складність алгоритму складає  $O(n^2 W)$  ( $W = \sum_{i=1}^n p_i$ ), якщо в операціях обміну приймають участь не більше 2-х завдань, та  $O(n^4 W)$  – якщо не більше 4-х завдань.

**Задача 2.** Перша задача є частковим випадком цієї задачі, вони відрізняються продуктивністю пристроїв. Для цієї задачі невідомий поліноміальний алгоритм розв'язання.

Теоретично мінімальний час, за який усі пристрої могли б виконати усі

завдання в об'ємі  $\sum_{j=1}^n p_j$ , складає

$$C^* = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{k_i p_j}}. \quad (4)$$

Ця величина отримана, за умови, що усі пристрої паралельно виконують кожне із завдань. Для цього  $m$  паралельних пристроїв розглядаються як один, а фактичні тривалості завдань замінюються їх так званими узагальненими значеннями, рівними  $\tilde{p}_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{k_i p_j}}$ . Величина  $C^*$  може бути як цілим так і не цілим

числом. За умови ідентичності пристроїв вираз (4) для величини  $C^*$  співпадає з (1).

Позначимо у розкладі  $\sigma$ :  $T_i(\sigma) = \sum_{j \in J_i(\sigma)} k_i p_j$  – тривалість зайнятості пристрою  $i$ ;

$T'_i(\sigma) = \frac{T_i(\sigma)}{k_i}$  – зведену тривалість зайнятості пристрою  $i$  ( $i = \overline{1, m}$ );  $c_i^* = \frac{C^*}{k_i}$  – «ідеальні» зведені тривалості зайнятості пристроїв;  $\Delta'_i(\sigma) = \max\{0; T'_i(\sigma) - c_i^*\}$ ;  $R'_i(\sigma) = \max\{0; c_i^* - T'_i(\sigma)\}$  ( $i = \overline{1, m}$ ). Для введених величин виконується така умова:  $\sum_{j \in J_i(\sigma)} p_j = c_i^* - R'_i(\sigma) + \Delta'_i(\sigma)$ ,  $i = \overline{1, m}$ .

Критерій оптимізації вихідної задачі (максимізація моменту  $r$  запуску пристроїв)  $r = d - (C^* + \max_{1 \leq i \leq m} \Delta_i(\sigma)) \rightarrow \max$  є еквівалентним критерію мінімізації загального часу виконання усіх завдань:  $C^* + \max_{1 \leq i \leq m} \Delta_i(\sigma) \rightarrow \min$ .

Із застосуванням методології побудови ПДС-алгоритмів у роботі визначені достатні умови оптимальності розкладів.

**Достатні умови оптимальності.** «Ідеальним» розкладом є рівномірний розклад, тобто розклад, у якого  $\sum_{i=1}^m \Delta_i(\sigma) = \sum_{i=1}^m R_i(\sigma) = 0$ . Такий розклад можна

отримати тільки тоді, коли значення  $C^*$  та усі  $c_i^* = \frac{C^*}{k_i}$  є цілими числами. Отже, визначено таку ознаку оптимальності розкладу (ДУО 2.1): якщо в розкладі  $\sum_{j \in J_i} p_j = c_i^*$ ,  $(\sum_{i=1}^m \Delta'_i(\sigma) = \sum_{i=1}^m R'_i(\sigma) = 0)$ ,  $i = \overline{1, m}$ , то поточний розклад є оптимальним.

Якщо виконується умова  $\exists i | c_i^* \notin Z$ , то принципово неможливо побудувати рівномірний розклад. Нехай  $\delta = \sum_{j=1}^n p_j - \sum_{i=1}^m \lfloor c_i^* \rfloor$ , де  $\delta \geq 0$  і воно є цілим. Визначимо, який вигляд матиме «ідеальний» розклад у випадку  $\delta > 0$ .

**Визначення.** Розклад, у якому на пристрої призначені не усі завдання із множини  $J$ , будемо називати *неповним*.

Розподілимо між пристроями деяку кількість завдань (нехай вони складають множину  $\bar{J} \subset J$ ), таким чином отримаємо неповний розклад  $\bar{\sigma}$ , у якому  $\sum_{j \in \bar{J}_i} p_j = \lfloor c_i^* \rfloor$ ,  $i = \overline{1, m}$ , де  $\bar{J}_i$  – множина завдань, які в розкладі  $\bar{\sigma}$  виконуються пристроєм  $i$ ). Зазначимо, що залишилися недорозподіленими завдання, сумарна тривалість виконання яких становить  $\delta = \sum_{j=1}^n p_j - \sum_{i=1}^m \sum_{j \in \bar{J}_i} p_j = \sum_{j=1}^n p_j - \sum_{i=1}^m \lfloor c_i^* \rfloor$ .

Припустимо, що залишилось розподілити  $\delta$  завдань, еталонна тривалість кожного з яких дорівнює 1. Отже, перед нами постає така задача: розподілити одиничні завдання в кількості  $\delta$  між пристроями так, щоб максимальний з виступів повного розкладу був мінімальним. У результаті отримаємо розклад, у якому робота в об'ємі  $\sum_{j=1}^n p_j$  розподілена найкращим чином. У роботі позначено:  $e_i = c_i^* - \sum_{j \in \bar{J}_i} p_j$ ,  $i = \overline{1, m}$ , де  $e_i$  – резерв пристрою  $i$  у неповному розкладі  $\bar{\sigma}$ , в якому недорозподілено  $\delta$  одиничних завдань. З урахуванням вищенаведеного маємо:  $e_i = c_i^* - \lfloor c_i^* \rfloor$ ,  $i = \overline{1, m}$ ;  $\forall e_i \geq 0$ ;  $\sum_{i=1}^m e_i = \sum_{j=1}^n p_j - \sum_{i=1}^m \lfloor c_i^* \rfloor = \delta$ . Таким чином, можна сформулювати наступну допоміжну оптимізаційну задачу (ДОЗ) 1: необхідно  $\delta$  завдань одиничної довжини розподілити між  $m$  пристроями, за умов, що пристрій  $i$  має резерв  $e_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  та  $\sum_{i=1}^m e_i = \delta$  з метою мінімізації максимального з виступів з урахуванням продуктивностей пристроїв.

Математична модель ДОЗ 1: визначити кількість  $x_i$  «одиничних» еталонних завдань, що повинні бути призначені на пристрій  $i$ ,  $i = \overline{1, m}$ , при яких  $\max_i \{k_i(x_i - e_i)\} \rightarrow \min$  та виконуються обмеження  $\sum_{i=1}^m x_i = \delta$ , де  $x_i \geq 0$  і є цілим.

У роботі розроблено алгоритм розв'язання цієї задачі.

ДУО 2.2. (Якщо  $\exists i \mid c_i^* \notin \mathbb{Z}$ , тобто  $\delta > 0$ ). Нехай  $x_i^*$ ,  $i = \overline{1, m}$  – розв'язок ДОЗ 1,  $T_i^* = C^* + k_i(x_i^* - e_i)$  – тривалість виконання завдань пристроєм  $i$  в «ідеальному» розкладі. Тоді розклад  $\sigma$ , в якому:  $T_i'(\sigma) = \lfloor c_i^* \rfloor + x_i^*$ ,  $i = \overline{1, m}$  або  $T_i(\sigma) = T_i^*$ ,  $i = \overline{1, m}$ , є оптимальним.

Введемо позначення:  $Z_i(\sigma) = \max\{0; T_i(\sigma) - T_i^*\} = \max\left\{0; \sum_{j \in J_i(\sigma)} k_i p_j - T_i^*\right\}$ ,  $I_Z(\sigma)$  – множина пристроїв, для яких  $Z_i(\sigma) > 0$ ;  $E_i(\sigma) = \max\{0; T_i^* - T_i(\sigma)\} = \max\left\{0; T_i^* - \sum_{j \in J_i(\sigma)} k_i p_j\right\}$ ;  $I_E(\sigma)$  – множина пристроїв, для яких  $E_i(\sigma) > 0$ .

У дисертації запропоновано використовувати операції обміну завдань між пристроями з множин  $I_Z(\sigma)$ ,  $I_E(\sigma)$  та  $I_0(\sigma)$ , які направлені на зменшення величини

$\max_i Z_i(\sigma)$ , що приводить до покращення розкладу. У роботі наведена множина операцій обміну завдань, в якій у залежності від умов виконання та наслідків, виділено чотири типи  $Ak$ ,  $Bk$ ,  $Bk$ ,  $Gk$  та п'ять підтипів операцій. На основі умов оптимальності та розробленої множини операцій обміну побудована поліноміальна складова ПДС-алгоритму розв'язання задачі:

*Крок 1* Визначити  $\delta$ . Розв'язати за необхідності ДФЗ 1. Визначити ДУО.

*Крок 2* Побудувати початковий розклад  $\sigma^0, \sigma = \sigma^0$ .

*Крок 3* **ЯКЩО** для  $\sigma$  виконується одна з умов оптимальності

*ТО* перейти на крок 6 ( $\sigma$  – оптимальний розклад).

*Крок 4* Визначити пристрій  $h$ , якому відповідає  $Z_h(\sigma) = \max_{i \in I_Z(\sigma)} Z_i(\sigma)$ .

*Крок 5* Виконати для пристрою  $h$ , перебираючи усі пристрої  $s \in I_E(\sigma) \cup I_0(\sigma) \cup I_Z(\sigma)$ , операцію обміну типу  $Ak$ ,  $Bk$ ,  $Bk$  або  $Gk$  (отримали розклад  $\sigma^1$ )

**ЯКЩО** таких операцій обмінів не знайшлося, *ТО* перейти на крок 6,

**ІНАКШЕ**  $\sigma = \sigma^1$ , перейти на крок 3.

*Крок 6* Визначити максимально пізній момент запуску завдань на виконання:  $r_{\max} = r(\sigma) = d - \max_i T_i(\sigma)$ . **КІНЕЦЬ АЛГОРИТМУ**.

У роботі для кроку 5 наведено можливі варіанти реалізації.

Верхня межа відхилення значення критерію отриманого розв'язку від оптимального значення  $\max_i Z_i(\sigma)$ .

Для перевірки ефективності розроблених алгоритмів була проведена серія експериментів. Для цього запропонована класифікація індивідуальних задач складання розкладів, в основу якої покладені такі характеристики: кількість, середня тривалість завдань та закон їх розподілу, «ступінь розсіювання» довжин завдань, «ступінь розсіювання» коефіцієнтів продуктивності пристроїв. Під час проведення експериментів на вхід алгоритму подавалися серії задач різних типів. При цьому були досліджені різні стратегії пошуку операцій обміну: пошук першого допустимого «простого» обміну (*simple/first*), пошук найкращого з можливих «простих» обмінів (*simple/best*), пошук найкращого з можливих «складних» обмінів (*complex/best*). Експерименти показали: найкращі результати демонструє стратегія *complex/best* на коротких завданнях незалежно від розсіювання (практично 100-відсоткове попадання в оптимум); але, в той же час, ця стратегія є найповільнішою з розглянутих, тому може бути неприйнятною при потребі швидко розв'язати велику кількість задач; для задач з короткими завданнями усі стратегії дають результати, близькі до оптимуму (щонайменше 95-100% попадання в оптимум); як і очікувалось, збільшення розсіювання тривалостей завдань скорочує час, необхідний для пошуку розв'язку, це особливо помітно на задачах з короткими завданнями; стратегія *simple/first* дозволяє отримувати розв'язок дуже швидко, але при цьому дає найбільший (проте все ще прийнятний) відсоток відхилення від оптимуму; щодо впливу розподілу тривалостей завдань виявлено, що у порівнянні з рівномірним розподілом, стратегія *complex/best* для нормального розподілу працює швидше при

великих дисперсіях тривалостей, але при цьому частка знайдених оптимальних розв'язків є дещо меншою (в середньому 15% проти 8%).

Отже, набув подальшого розвитку метод розв'язання задачі визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним директивним строком паралельними ідентичними пристроями, який базується на основі достатніх умов оптимальності та, на відміну від існуючих методів, має статистично сталі високі показники роботи. Вперше сформульовані ДУО для важкорозв'язуваної задачі складання допустимих розкладів виконання завдань паралельними пристроями різної продуктивності з метою визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним директивним строком.

Результати даного розділу описані в працях [1-3, 6, 11, 16, 17].

У **третьому** розділі запропоновано методи розв'язання задачі складання розкладів виконання завдань паралельними пристроями: 1) однакової продуктивності з метою мінімізації максимуму відхилення моментів завершення завдань пристроями від загального директивного строку; 2) різної продуктивності з метою побудови розкладу з максимально рівномірним розподілом завдань між пристроями (розкладу, в якого досягає мінімуму максимальне з відхилень моментів завершення виконання завдань пристроями від ідеального значення моменту завершення завдань). Задачі близькі за змістом: у першій задачі величина, відносно якої вимірюється відхилення, є заданою (загальний директивний строк завдань), а у другій ця величина є розрахунковою (представляє собою ідеальне значення моменту завершення виконання усіх завдань).

**Задача 3.** Задано множину завдань  $J$  ( $|J|=n$ ), кількість пристроїв  $m$ , для завдання  $j \in J$  відома тривалість виконання  $p_j$ . Передбачається, що всі завдання надходять одночасно і мають спільний директивний строк  $d$  ( $d \in N$ ,  $p_j \in N$ ,  $j = \overline{1, n}$  - директивний строк та тривалість виконання завдань є натуральними числами). Усі пристрої починають свою роботу в нульовий момент часу. Завдання виконуються без переривань. Необхідно знайти розклад, в якому мінімізується максимальне відхилення від директивного строку моменту завершення пристроями всіх своїх завдань.

У роботі розглядається випадок, коли НСД значень  $p_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  та  $d$  дорівнює одиниці (цього завжди можна досягти, розділивши ці величини на їх НСД) та

$\left| \sum_{j=1}^n p_j - dm \right| < m$ . У дисертації позначено:  $\delta = \sum_{j=1}^n p_j - dm$ ;  $C_i(\sigma)$  - момент завершення

виконання всіх завдань пристроєм  $i$  у розкладі  $\sigma$ ,  $\Delta_i(\sigma) = \max\{0; C_i(\sigma) - d\}$ ,  $R_i(\sigma) = \max\{0; d - C_i(\sigma)\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ . З врахуванням обраних позначень критерій задачі має вигляд  $\max_i \{C_i(\sigma) - d\} \rightarrow \min$  або  $\max_i \{R_i(\sigma); \Delta_i(\sigma)\} \rightarrow \min$ . Критерій

оцінювання розкладу можна також інтерпретувати так: необхідно знайти такий розклад, в якому пристрої навантажені максимально рівномірно. Доведено, що для цієї задачі існує оптимальний розклад, який задовольняє умовам (1)-(2).

### **Достатні умови оптимальності**

**ДУО 3.1.**  $\delta = 0$ . У цьому випадку достатньою умовою оптимальності розкладу є рівномірне завантаження пристроїв:  $C_i(\sigma) = d$ ,  $i = \overline{1, m}$ .

**ДУО 3.2.**  $\delta \neq 0$ . У цьому випадку достатніми умовами оптимальності розкладу є:  $\Delta_i(\sigma) \in \{0, 1\}$ ,  $i = \overline{1, m}$  та  $R_i(\sigma) \in \{0, 1\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ .

Оптимізація розкладу полягає в послідовному зменшенні величини  $\max_i \{R_i(\sigma); \Delta_i(\sigma)\}$ , чого можна досягнути за допомогою обміну завданнями між пристроями. У роботі розроблено множину операцій обміну, в залежності від їх наслідків, які поділяються на такі типи: **A**, **БД**, **БР**, **В**, **ГД**, **ГР**. Деякі операції обміну, розроблені для задачі 1, застосовані і для цієї задачі.

На основі ДУО та розробленої множини операцій обміну побудовано ПДС-алгоритм розв'язання задачі, який наведено у дисертаційній роботі. Верхня межа відхилення значення критерію отриманого розв'язку від оптимального значення  $\max_i \{R_i(\sigma); \Delta_i(\sigma)\}$  (якщо  $\delta = 0$ ),  $\max_i \{R_i(\sigma); \Delta_i(\sigma)\} - 1$  (якщо  $\delta \neq 0$ ).

**Задача 4.** Задано множину завдань  $J = \{1, 2, \dots, n\}$  та кількість пристроїв  $m$ . Пристрої працюють паралельно і є взаємозамінними. Пристрої відрізняються продуктивністю виконання завдань, і є одноманітними. Всі завдання множини  $J$  надходять одночасно (в нульовий момент часу), процес обслуговування кожного завдання протікає без переривань до завершення обслуговування. Необхідно побудувати розклад з максимально рівномірним завантаженням пристроїв.

За змістом ця задача є близькою до задачі 2. Але якщо в задачі 2 ми намагались мінімізувати загальний час виконання завдань, то в поточній задачі намагатимемось якомога рівномірно навантажити пристрої.

З урахуванням позначень, введених для задачі 2, розкладом з максимально рівномірним завантаженням будемо вважати розклад, у якому досягає мінімуму максимальне з відхилень моментів завершення пристроями всіх своїх завдань від «ідеального» часу  $C^*$ , визначеного формулою (4), за який усі пристрої могли б виконати свої завдання:  $\max_i \{R_i(\sigma); \Delta_i(\sigma)\} \rightarrow \min$ .

### **Достатні умови оптимальності**

**ДУО 4.1.** Випадок, коли принципово можливо отримати рівномірний розклад. Якщо  $C^*$  та усі  $c_i^*$  є цілими числами і при цьому у розкладі  $\sigma$  для зведених моментів завершення виконання усіх завдань пристроєм  $i$  виконується умова  $C_i'(\sigma) = \sum_{j \in J_i} p_j = c_i^*$ ,  $i = \overline{1, m}$ , то поточний розклад є рівномірним (оптимальним).

**ДУО 4.2.** Випадок, коли принципово не можливо отримати рівномірний розклад. Якщо  $\delta = \sum_{j=1}^n p_j - \sum_{i=1}^m \lfloor c_i^* \rfloor > 0$  ( $\exists i \mid c_i^* = \frac{C^*}{k_i} \notin Z$ ), то необхідно розв'язати ДОЗ 2: визначити кількість  $x_i$  «одиничних» еталонних завдань, що повинні бути призначені



на пристрій  $i, i = \overline{1, m}$ , за умови, що  $\sum_{i=1}^m x_i = \delta$ ,  $x_i \geq 0$  і  $i$  є цілим, при яких  $\max_i \{ |k_i(e_i - x_i)| \} \rightarrow \min$ . У роботі розроблено алгоритм розв'язання цієї задачі.

Нехай  $x_i^*, i = \overline{1, m}$  – оптимальний розв'язок ДОЗ 2,  $T_i^* = C^* + k_i(x_i^* - e_i)$  – тривалість виконання завдань  $i$ -м пристроєм в «ідеальному» розкладі. Тоді розклад  $\sigma$ , в якому:  $C'_i(\sigma) = \lfloor c_i^* \rfloor + x_i^*, i = \overline{1, m}$  або  $C_i(\sigma) = T_i^*, i = \overline{1, m}$ , є оптимальним.

З урахуванням ДУО розкладів у роботі визначена множина операцій обміну, яка дозволяє послідовно покращувати значення критерію. На основі ДУО та множини операцій обміну побудований ПДС-алгоритм складання розкладу з максимально рівномірним завантаженням паралельних пристроїв різної продуктивності, який наведено у дисертаційній роботі.

Верхню межу відхилення значення критерію отриманого розв'язку від оптимального значення визначається умовою  $\max_i (Z_i(\sigma), E_i(\sigma))$ .

Для перевірки ефективності розроблених алгоритмів була проведена серія експериментів. Для цього використовувалася класифікація індивідуальних задач складання розкладів, запропонована для задач 1 та 2. Під час проведення експериментів на вхід алгоритму подавалися серії задач різних типів та були досліджені різні стратегії пошуку операцій обміну. Результати експериментів подібні до результатів, отриманих для методів розв'язання задач 1 та 2.

Отже, вперше сформульовані ДУО для важкорозв'язуваних задач складання допустимих розкладів виконання завдань паралельними ідентичними та з різними продуктивностями пристроями з метою мінімізації максимуму відхилення моментів завершення завдань пристроями від заданого строку. На основі цих ДУО розроблено методи їх розв'язання; визначено верхню межу відхилення значення критерію отриманого розв'язку від оптимального значення.

Результати даного розділу описані в працях [5, 7, 10, 12-15, 19].

**Четвертий** розділ присвячено розробленню ІТОКПДВ за концепцією «точно в строк». Докладно описаний процес розроблення інформаційної технології, що задовольняє вимогам, сформульованим у розділі 1, і характеризується широкими функціональними можливостями: ведення об'ємного плану виробництва; складання планів завантаження потужностей; формування різного типу звітності; реалізація описаних у попередніх розділах методів розв'язання задач, що вирішуються при оперативно-календарному плануванні виробництва.

У роботі детально опрацьовані етапи проектування та реалізації інформаційної технології. Обґрунтовано вибір програмних технологій, компонентів, необхідних для розробки та реалізації інструментального комплексу ІТОКПДВ.

Інструментальний комплекс розроблений із застосування «тонкого» клієнта з трирівневою архітектурою, яка наведена на рисунку 2. У дисертаційній роботі детально розглянуто компоненти інформаційної технології та принципи їх функціонування. Описано трирівневу архітектуру сервера застосувань, яка передбачає взаємодію компонентів рівнів представлення даних, бізнес-логіки, доступу до даних.

У дисертаційній роботі наведені пакети та класи інструментального комплексу з описом основних функцій з їх параметрами та значеннями, розроблена структура бази даних з використанням реляційної бази даних PostgreSQL. Наведено обґрунтування вибору стеку технологій розроблення, до яких увійшли: високорівнева мова програмування Java, реляційна база даних PostgreSQL, платформа Java Enterprise Edition, Spring MVC Framework, бібліотека Hibernate.

У роботі представлено рішення з алгоритмічного забезпечення ІТ. Воно розроблене з врахуванням особливостей планування дрібносерійного виробництва та базується на алгоритмах розв'язання важкорозв'язуваних задач, які були досліджені в роботі. У рамках розробки інформаційної технології було вирішено задачу формування узагальненого технологічного графу проходження завдань по виробничих дільницях, диспетчеризації складання розкладів виконання завдань на окремих дільницях за узагальненим технологічним графом.

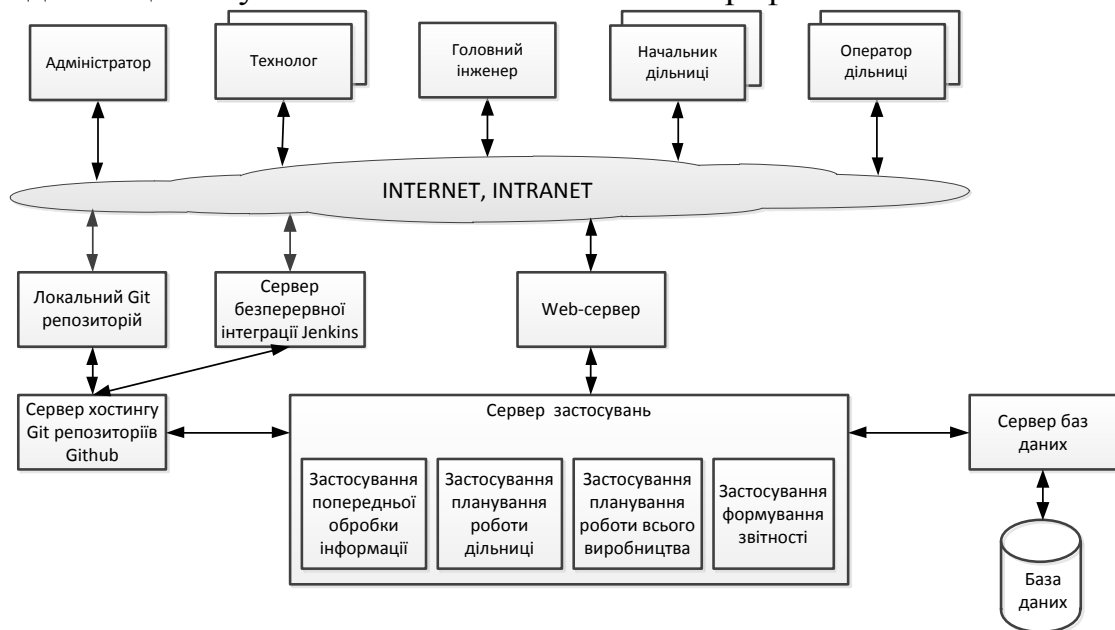


Рис. 2. Архітектура інструментального комплексу ІТОКПДВ

Отже, удосконалено ІТОКПДВ за концепцією «точно в строк» за рахунок раціонального поєднання компонентів і реалізації розроблених ефективних методів розв'язання виробничих задач, характерних для дрібносерійного виробництва. На відміну від існуючих інформаційних технологій застосування ІТОКПДВ дозволило зменшити час формування планів на 15% і підвищити їх якість за часовими критеріями на 5-10%.

Результати даного розділу описані в працях [4, 8, 9, 20, 21].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна науково-практична задача розроблення ІТОКПДВ за концепцією «точно в строк», що дозволяє будувати близькі до оптимальних за часовими критеріями календарні плани, а це, в свою чергу, призводить до підвищення ефективності функціонування виробничих систем.

У цілому, на основі виконаного в дисертації дослідження отримано такі результати:

1. На основі проведеного огляду й аналізу систем, методологій та концепцій

планування, моделей та методів складання календарних планів виробництва в сучасних умовах запропоновано підхід до розв'язання задач оперативно-календарного планування за рахунок виділення важливих класів задач і встановлення умов, за яких вони в статистичному сенсі можуть бути розв'язані за прийнятний час.

2. Вперше сформульовані достатні умови оптимальності для задач складання розкладу: визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним жорстким директивним строком паралельними пристроями різної продуктивності; мінімізації максимуму відхилення від директивного строку моментів завершення завдань паралельними ідентичними пристроями; максимально рівномірного завантаження паралельних пристроїв різної продуктивності. На основі сформульованих достатніх умов оптимальності для цих задач розроблено методи їх розв'язання, які для поширених на практиці виробничих задач мають статистично сталі високі показники роботи, що дозволяє ефективно розв'язувати ці задачі за прийнятний час; визначено верхню межу відхилення значення критерію отриманого розв'язку від оптимального значення. Набув подальшого розвитку метод розв'язання задачі визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним директивним строком паралельними ідентичними пристроями, який базується на основі достатніх умов оптимальності та, на відміну від існуючих методів, має статистично сталі високі показники роботи..

3. Досліджено ефективність розроблених методів побудови розкладів. Для цього була запропонована класифікація задач у залежності від кількості завдань, середньої тривалості завдань, ступеню розсіювання довжин завдань та коефіцієнтів продуктивності пристроїв. Під час проведення серії експериментів виявлені підкласи задач, для яких методи дають результати, близькі до оптимальних (достатні умови оптимальності виконуються у 95-100%, при невиконанні цих умов верхня межа відхилення від оптимального значення критерію не перевищує 5%).

4. Для оперативно-календарного планування дрібносерійного виробництва розроблено інформаційну технологію, яка базується на застосуванні розроблених ефективних методів розв'язання задач складання розкладів, що дозволяють будувати оптимальні або близькі до оптимальних за часовими критеріями календарні плани згідно концепції «точно в строк».

5. Виконане експериментальне дослідження розробленої ІТ, яке показало, що її впровадження дозволило зменшити час на складання календарних планів виробництва на 15%, при цьому якість складених планів покращилась за рахунок виконання замовлень точно в строк, час виконання замовлень зменшився на 5-10%. Розроблену ІТ впроваджено:

- в ПАТ «Виробничо-комерційна фірма «АС»», де її використання дозволило покращити процес планування виробництва, а саме: скоротити час планування та виготовлення виробів, заощаджувати виробничі ресурси, і тим самим збільшити об'єми виробництва;

- ТОВ «БІ ДЖІ ЕФ ЦЕНТРАЛ СУРОП», де розроблені моделі, методи та підходи до оперативно-календарного планування виробництва використовуються при розробленні програмного забезпечення для управління проектами. Це дозволило прискорити процес розподілу завдань між виконавцями та отримати такі плани

виконання проектів, які забезпечують виконання усіх запланованих завдань максимально точно в строк;

- в теоретичних курсах на кафедрі автоматизованих систем обробки інформації та управління ФІОТ НТУУ «Київський політехнічний інститут».

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

*Статті у наукових фахових виданнях:*

1. Павлов О.А. Поліноміальна складова ПДС-алгоритму розв'язання однієї задачі теорії розкладів / О.А. Павлов, О.Г. Жданова, О.Б. Місюра, М.О. Сперкач // Технологический аудит и резервы производства, 2013. — №6/3 (14). — С.47-52 (особистий внесок: розроблені множини операцій обміну, алгоритм розв'язання задачі; індексується в Ulrich's Periodicals Director, DRIVER, BASE, Index Copernicus, PІНЦ, ResearchBib, DOAJ, WorldCat, EBSCO, Directory Indexing of International Research Journals, DRJI, OAJI, Sherpa/Romeo, Open Access Articles).
2. Павлов А.А. Задача составления допустимого расписания с максимально поздним моментом запуска выполнения идентичными параллельными приборами работ с общим директивным сроком / А.А. Павлов, М.О. Сперкач, Е.Г. Жданова // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». — К.: “БЕК+”, 2014. — №61 — С.93-102 (особистий внесок: розроблено метод розв'язання задачі; індексується в DOAJ, PІНЦ, Google Scholar).
3. Павлов А.А. Выполнение заданий с общим директивным сроком параллельными приборами по критериям оптимальности: минимизация суммарного опережения относительно директивного строка и максимизация момента запуска заданий на выполнение / А.А. Павлов, М.О. Сперкач // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». — К.: “БЕК+”, 2015. — №62 — С.89-92 (особистий внесок: розроблено алгоритм розв'язання задачі; індексується в DOAJ, PІНЦ, Google Scholar).
4. Павлов А.А. Субоптимальный полиномиальный алгоритм решения одного класса многоэтапных сетевых задач календарного планирования / А.А. Павлов, М.О. Сперкач, Е.А. Халус // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». — К.: “БЕК+”, 2012. — №57. — С. 51–55 (особистий внесок: розроблено алгоритм побудови субоптимального поліноміального алгоритму розв'язання багатоетапної мережевої задачі календарного планування; індексується в DOAJ, PІНЦ, Google Scholar).
5. Павлов А.А. Составление расписания выполнения работ параллельными приборами с целью минимизации максимального отклонения от директивного срока / А.А. Павлов, Е.Г. Жданова, М.О. Сперкач // Вісник ХНТ ім. В.Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». — Х.: 2015. — №1156 — С.92-106 (особистий внесок: розроблено метод розв'язання задачі).
6. Сперкач М.О. Задача визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним жорстким директивним терміном паралельними пристроями різної продуктивності / М.О. Сперкач // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». — К.: “БЕК+”, 2015. — №63

– С.12-18 (індексується в DOAJ, РІНЦ, Google Scholar).

7. Павлов О.А. Задача складання розкладу виконання завдань паралельними приладами з метою мінімізації максимуму відхилення від директивного терміну моментів завершення приладами усіх завдань / О.А. Павлов, М.О. Сперкач, О.Г. Жданова // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія «Технічні науки». – Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2014. – № 10. – с. 148 – 158 106 (особистий внесок: сформульовані достатні умови оптимальності, розроблено множини операцій обміну).
8. Павлов А.А. Четырехуровневая модель планирования, принятия решений и оперативного управления в сетевых системах с ограниченными ресурсами / А.А. Павлов, М.О. Сперкач, Е.Б. Мисюра, Т.Н. Лисецкий // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». – К.: «БЕК+», 2013. – №58 – С. 11-23 (особистий внесок: сформульовано моделі третього рівня чотирьохрівневої моделі планування та оперативного управління; індексується в DOAJ, РІНЦ, Google Scholar).
9. Павлов А.А. Результирующая формализация первого уровня трехуровневой модели оперативного планирования и принятия решений по критерию минимизации суммарного опережения директивных сроков / А.А. Павлов, М.О. Сперкач, Е.Б. Мисюра, Е.А. Халус, Г.А. Аракелян // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». – К.: «БЕК+», 2012. – №56. – С. 56–57 (особистий внесок: сформульовано часткові моделі спеціальної мережевої багатоетапної задачі календарного планування; індексується в DOAJ, РІНЦ, Google Scholar).
10. Жданова О.Г. Складання розкладу виконання завдань неідентичними паралельними пристроями з метою максимально рівномірного завантаження пристроїв / М.О. Сперкач, О.Г. Жданова // Вісник ХНТ ім. В.Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». – Х.: 2015. – №28 – С.33-50 (особистий внесок: сформульовані достатні умови оптимальності, розроблено метод розв'язання задачі).

*Матеріали науково-технічних конференцій:*

11. Жданова О.Г. Достатні умови оптимальності розкладу задачі визначення максимально пізнього моменту початку виконання завдань із спільним жорстким директивним терміном паралельними пристроями різної продуктивності / М.О. Сперкач, О.Г. Жданова // Матеріали десятої міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2015», Київ-Жукин, 22-26 червня 2015 р. – м. Чернігів.: ЧДІЕУ. – С.109-112 (особистий внесок: сформульовано достатні умови оптимальності розкладу).
12. Жданова О.Г. Властивості перестановок ПДС-алгоритму розв'язання задачі складання розкладу виконання завдань паралельними приладами з метою мінімізації максимуму відхилення від директивного терміну моментів завершення приладами усіх завдань / О.Г. Жданова, Т.О. Морозовський, М.О. Сперкач // Матеріали десятої міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2015», Київ-Жукин, 22-26 червня 2015 р. – м. Чернігів.: ЧДІЕУ. – С.113-116 (особистий внесок:

розроблено множини операцій обміну).

13. Жданова О.Г. Достатні умови оптимальності розкладу виконання завдань паралельними пристроями різної продуктивності з максимально рівномірним завантаженням пристроїв / О.Г. Жданова, М.О. Сперкач // Матеріали десятої міжнародної науково-практичної конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту», 25-28 травня 2015 р. – м. Херсон: ХНТУ. – С. 61-63 (особистий внесок: сформульовані достатні умови оптимальності розкладу).
14. Жданова О.Г. Множина перестановок завдань як складова ПДС-алгоритму розв'язання однієї задачі теорії розкладів / О.Г. Жданова, М.О. Сперкач // «Актуальні проблеми гуманітарних та природничих наук», м. Одеса, 03-04 квітня 2015 р. — Херсон: Видавничий дім "Гельветика", – С. 94-96 (особистий внесок: множина операцій обміну).
15. Павлов О.А. Ознаки оптимальності для складання розкладу виконання завдань паралельними пристроями з метою мінімізації максимуму відхилення від директивного терміну моментів завершення пристроями усіх завдань [Електронний ресурс] / О.А. Павлов, М.О. Сперкач, О.Г. Жданова // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами», 27 листопада 2014 р. – К: НУХТ, 2014 р. – С. 76-78. — Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii> (особистий внесок: сформульовані достатні умови оптимальності розкладу).
16. Жданова О.Г. Задача визначення максимального пізнього моменту початку виконання завдань із спільним жорстким директивним терміном паралельними приладами різної продуктивності / М.О. Сперкач, О.Г. Жданова // Матеріали дев'ятої міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2014», Київ-Жукин, 23-27 червня 2014 р. – м. Чернігів.: ЧДІЕУ. – С. 108 – 112 (особистий внесок: розроблено метод розв'язання задачі).
17. Жданова О.Г. Задача визначення максимально пізнього моменту початку виконання в допустимому розкладі завдань із спільним директивним терміном паралельними приладами з різною продуктивністю / М.О. Сперкач, О.Г. Жданова // Матеріали доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми економіки та управління сучасної України», м. Ужгород, 16-17 травня 2014 р. / За. заг. ред.: М.М. Палінчак, В.П. Приходько. – Ужгород: Видавничий дім «Гельветика», 2014. – С. 291 – 293 (особистий внесок: розроблено метод розв'язання задачі).
18. Сперкач М.О. Застосування бджолиного алгоритму для розв'язання задачі складання розкладу виконання завдань паралельними ідентичними приладами / М.О. Сперкач, К.М. Новак // Матеріали доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми економіки та управління сучасної України», м. Ужгород, 16-17 травня 2014 р. / За. заг. ред.: М.М. Палінчак, В.П. Приходько. – Ужгород: Видавничий дім «Гельветика», 2014. – С. 312 – 316 (особистий внесок: розроблено алгоритм розв'язання задачі).
19. Павлов О.А. Складання розкладу виконання завдань паралельними приладами з

- метою мінімізації максимуму відхилення від директивного терміну моментів завершення приладами усіх завдань / О.А. Павлов, М.О. Сперкач, О.Г. Жданова// Матеріали 21-ї міжнародної конференції з автоматичного управління «Автоматика-2014», м.Київ, 23-27 вересня 2014 р. – Чернігів.: Вид-во НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2014. – С. 212 – 214 (особистий внесок: розроблено метод розв’язання задачі).
20. Сперкач М.О. Формування графа передування робіт багатоетапної задачі складання розкладу з метою мінімізації сумарного випередження директивних термінів: матеріали IV Всеукраїнської заочної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні технології», м. Київ, 27 травня 2013 р.: тези / М.О. Сперкач, Т.О. Морозовський, К.О. Лук’яненко / [редкол.: Жданова О.Г. та ін.] – С. 70–73 (особистий внесок: розроблено підхід до формування графа передування робіт багатоетапної задачі складання розкладу).
21. Сперкач М.О. Побудова узагальненого графа передування робіт багатоетапної задачі календарного планування мінімізації сумарного випередження директивних термінів / О.Г. Жданова, К.О. Лук’яненко, Т.О. Морозовський, М.О. Сперкач // Математичне та імітаційне моделювання систем: матеріали 8-ї Міжнародної науково-практичної конференції МОДС 2013 – Чернігів, 2013. – С. 150-154 (особистий внесок: розроблено алгоритм побудови узагальненого технологічного графа передування робіт багатоетапної задачі календарного планування).
22. Павлов А.А. Сравнительные характеристики задач составления расписаний выполнения заданий с общим директивным сроком параллельными приборами равной производительности по различным критериям оптимальности / А.А. Павлов, Е.Б. Мисюра, М.О. Сперкач // Інформаційні технології як інноваційний шлях розвитку України у ХХІ столітті: Матеріали I Міжнародній науково-практичній конференції молодих науковців 06–08 грудня 2012 р. – Ужгород: Закарпатський державний університет, 2012. – С. 109–112 (особистий внесок: проведення порівняння характеристик задач за різними критеріями оптимальності).

## АНОТАЦІЯ

**Сперкач М.О. Інформаційна технологія оперативно-календарного планування дрібносерійного виробництва за концепцією «точно в строк». – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» МОН України, Київ, 2016.

В дисертаційній роботі розв’язано актуальне науково-практичне завдання з розроблення інформаційної технології оперативно-календарного планування дрібносерійного виробництва, яка призводить до підвищення ефективності функціонування виробничих систем за рахунок побудови оптимальних (близьких до оптимальних) за часовими критеріями календарних планів. Розглянуто існуючі моделі та методи систем планування, теорії розкладів. Розроблено методи побудови

розкладів оперативно-календарного планування дрібносерійного виробництва. Обґрунтовано доцільність використання запропонованих методів. Проаналізовано ефективність запропонованих методів побудови розкладів. Розроблено інформаційну технологію оперативно-календарного планування дрібносерійного виробництва за концепцією «точно в строк». Проведені експериментальні дослідження інформаційної технології, які підтвердили адекватність запропонованих моделей та методів.

**Ключові слова:** розклад, теорія розкладів, ПДС-алгоритм, календарні плани, оперативно-календарне планування, дрібносерійне виробництво, точно в строк, інформаційна технологія.

## АНОТАЦИЯ

**Сперкач М.О. Информационная технология оперативно-календарного планирования мелкосерийного производства по концепции «точно в срок». – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – информационные технологии. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» МОН Украины, Киев, 2016.

В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача по разработке информационной технологии оперативно-календарного планирования мелкосерийного производства по концепции «точно в срок», которая приводит к повышению эффективности функционирования производственных систем за счет построения оптимальных (близких к оптимальным) по временным критериям календарных планов. Рассмотрены существующие модели и методы систем планирования, теории расписаний. Разработаны методы построения расписаний оперативно-календарного планирования мелкосерийного производства. Обоснована целесообразность использования предложенных методов. Проанализирована эффективность предложенных методов построения расписаний. Разработана информационная технология оперативно-календарного планирования мелкосерийного производства по концепции «точно в срок». Проведенные экспериментальные исследования информационной технологии подтвердили адекватность предложенных моделей и методов.

**Ключевые слова:** расписание, теория расписаний, ПДС-алгоритм, календарные планы, оперативно-календарное планирование, мелкосерийное производство, точно в срок, информационные технологии.

## ABSTRACT

**Sperkach M. O. Information technology of small-scale production scheduling on the concept of «just in time». Manuscript.**

Thesis for a candidate's technical science degree majoring in 05.13.06 – information technologies. – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is dedicated to solving a topical research and applied task of developing



the small-scale “just in time” production scheduling information technology. This information technology leads to increased efficiency of industrial systems’ functioning by constructing close to optimal schedules in terms of time criteria. During the research, existing planning models and systems, scheduling methods, production scheduling systems, scheduling theory models and methods are reviewed. The application of the methodology of constructing PDC-algorithms for intractable combinatorial optimization problems to developing scheduling algorithms is described. The literature analysis is done, in which the works are identified that offer different approaches to solving scheduling problems under study. The small-scale production scheduling process is reviewed for enterprises consisting of an industrial sections set. Based on the latter observations, the tedious scheduling problem is decomposed into smaller ones enabling us to distinguish scheduling problems by the industrial sections.

As a result, the methods for small-scale production scheduling are developed for the following problems: the problem of feasible scheduling for identical parallel machines in order to determine the latest starting time of performing tasks with common due date; the problem of feasible scheduling for uniform parallel machines in order to determine the latest starting time of performing tasks with common tough due date; the problem of scheduling for identical parallel machines in order to minimize the maximum deviation of ending times of performing tasks from the due date; the problem of scheduling for uniform parallel machines in order to determine the most uniform distribution of load. Properties of these problems are studied. Algorithms for initial schedule construction are given. Sufficient conditions for optimality and sets of tasks exchange operations are developed and used as a basis for the polynomial component of the PDC-algorithm. Auxiliary optimization problems are formulated, whose results are used to determine sufficient conditions for the problem of feasible scheduling for uniform parallel machines in order to determine the latest starting time of performing tasks with common tough due date and the problem of scheduling for uniform parallel machines in order to determine the most uniform distribution of load. Suitability of applying the proposed scheduling methods is grounded. The proposed methods’ effectiveness is analyzed with the help of the proposed classification of individual scheduling problems. This classification is based on the number of tasks, their average duration, probability distribution, duration variance, and the variance of machines’ productivity coefficients. During the experiments, series of tasks of different types are passed as inputs to the PDC-algorithm. As a result of the experiments, different permutations search strategies are studied. Problem subclasses are identified, for which the proposed methods yield almost perfect optimum.

The information technology of small-scale “just in time” production scheduling is developed based on the proposed scheduling methods. All the necessary algorithms for the information technology are described. The tasks solved in order to develop this information technology include formation of a generalized technological production graph, scheduling dispatching of tasks completion at different industrial sections using the generalized technological graph. Experiments are conducted that prove the practical significance of the developed information technology and adequacy of the proposed models and methods.

**Keywords:** schedule, scheduling theory, PDC-algorithm, production scheduling, small-scale production, just in time, information technology.